

B. Dencker
=

VERGLEICHENDE FARBSINNUNTERSUCHUNGEN
AM NAGELSCHEN ANOMALOSKOP
ZWISCHEN AMBLYOPEN UND ZUGEHÖRIGEN NORMALEN AUGEN

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der medizinischen Doktorwürde der
Hohen Medizinischen Fakultät der
Johannes Gutenberg-Universität zu Mainz

vorgelegt von
BRIGITTE DENCKER
aus Berlin



Dekan: Professor Dr.med., Dr.nat. Lang

Referent: Priv.-Doz. Oberarzt Dr.med. Oppel

Korreferent: Professor Dr.med. W. Herzau

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Januar 1962

GESAMTHERSTELLUNG:

DITTERS BÜRODIENST, MAINZ, Augustinerstraße 64-66

MEINEN LIEBEN ELTERN

GLIEDERUNG

- I. Einleitung: Kurze Übersicht über die Vorstellungen vom Wesen der Amblyopie
- II. Hauptteil:
 - 1. Fragestellung der Untersuchungen
 - 2. Methodik
 - 3. Untersuchungsergebnisse
 - a) Kasuistik
 - b) Tabellarische Zusammenstellung
 - c) Besprechung der Ergebnisse
 - 4. Überblick über Theorien des Farbensehens
 - 5. Diskussion
- III. Zusammenfassung
- IV. Schrifttum



Digitized by the Internet Archive
in 2026

I. EINLEITUNG: KURZE ÜBERSICHT ÜBER DIE VORSTELLUNGEN VOM WESEN DER AMBLYOPIE

In den letzten 20 - 30 Jahren haben sich die Vorstellungen über das Krankheitsbild der Amblyopie erheblich geändert. Im Gegensatz zu früheren Auffassungen, nach denen man die Ursache des verminderten Sehvermögens in organischen Veränderungen des Sehapparates sah, denkt man heute in erster Linie an funktionelle Störungen. Gestützt auf die bekannten Vorgänge der inneren Hemmung beim binocularen Sehen wurde in den 30er Jahren von Harms eine Theorie der funktionellen Schwachsichtigkeit vertreten, in der wir erstmals den Begriff der "Hemmungsamblyopie" finden. Nach dieser Theorie sieht Harms die Ursache des herabgesetzten Sehvermögens in zentral-nervösen Hemmungsvorgängen, die sich vom Occipitalhirn zentrifugal bis in die periphere Netzhaut erstrecken sollen. Diese Vorstellungen fanden in den letzten Jahren durch vielseitige Untersuchungen weitere Unterstützung. Zu erwähnen sind hier neben den pupillomotorischen Prüfungen von Harms, die elektrophysiologischen Versuche an der Sehrinde von Granit und die vergleichenden Untersuchungen über das Dunkeladaptationsvermögen amblyoper und zugehöriger normalsichtiger Augen von Oppel und seinen Mitarbeitern.

In letzteren Untersuchungen konnte vor allen Dingen gezeigt werden, daß die von Harms theoretisch angenommenen Vorstellungen über die Fortleitungen der corticalen Hemmungseinflüsse bis in die Peripherie, also bis in die Netzhaut, mit großer Wahrscheinlichkeit den Tatsachen entsprechen dürfte.

In der Symptomatologie der Amblyopie finden wir eine verminderte zentrale Sehschärfe als Hauptcharakteristikum, daneben aber noch einen Komplex anderer Minderleistungen des Auges. Da es nicht Absicht dieser Arbeit ist, die bei der Amblyopie anzutreffenden Störungen in ihren Einzelheiten darzulegen, sollen diese nur angeführt werden.

Die Herabsetzung oder der Verlust des zentralen Sehvermögens geht meist mit Trennungsschwierigkeiten und Beeinträchtigungen in Form- und Gestalterkennungsvermögen einher. Damit im engen Zusammenhang steht das Phänomen der exzentrischen Fixation, bei der das Auge versucht, durch Fixation mit demjenigen Netzhautanteil des noch verbliebenen besten Auflösungsvermögens seine optimalen Leistungen zu erreichen.

Die heutigen theoretischen Anschauungen über die Natur der einzelnen Fehl-

leistungen des amblyopen Auges und die sie bedingenden funktionellen Ursachen - besonders die Störungen des optognostischen Apparates - wurden erst jüngst in einer Veröffentlichung "Über unsere gegenwärtigen Vorstellungen vom Wesen der funktionellen Schwachsichtigkeit" von Oppel umfassend zusammengestellt.

Im Rahmen vergleichender Untersuchungen des Dunkeladaptationsvermögens amblyoper und dazugehöriger gesunder Partneraugen wurden Dunkeladaptationskurven gewonnen, die in der Endphase der Adaptation - also während des eigentlichen Nachtsehens - immer gleiche Anpassungsfähigkeit gaben. Aus der Verzögerung der Dunkeladaptationsfähigkeit in der Anfangsphase, d.h. der Zapfenadaptation, konnten interessante Folgerungen gezogen werden. Aus der Existenz unveränderter Stäbchenadaptationskurven ließen die Differenzen in der Anfangsphase der Dunkeladaptation bei der Amblyopie auf cortico-fugale Hemmungsimpulse schließen, die bis in die Netzhaut zu reichen, hier aber nur die Zapfenelemente zu betreffen scheinen. Die vergleichenden Untersuchungen des Dunkeladaptationsvermögens zeigten uns ferner, daß von der Retina des amblyopen Auges die Erregungen in verschiedener Weise zum Zentrum fortgeleitet werden können. Während die Erregungen über die multipolaren Ganglienzellen unbeeinträchtigt zum Zentrum geleitet zu werden scheinen (Endphase der Kurve!), werden sie über Direktfortleitungen offensichtlich gehemmt.

Im allgemeinen unterscheidet man heute zwei prinzipielle Leitungsmöglichkeiten: Die diffuse polysynaptische und die individuelle isolierte Fortleitung. Bei letzterer verfügt jedes einzelne Rezeptorelement über eine eigene monosynaptische Bipolare und eine Ganglienzelle. Diese Art der Reizfortleitung ist vor allem den Zäpfchen der Fovea centralis eigen. Die Verknüpfungen in der Peripherie sind breiter und großflächiger, wobei die Zapfen mit mehreren Bipolaren verschiedenster Formen, mit Horizontalzellen und Stäbchen gekoppelt sind und dadurch eine Zusammenarbeit in größeren Empfindungseinheiten zustande kommen.

Nach den Untersuchungen von Oppel darf angenommen werden, daß bei der funktionellen Schwachsichtigkeit in erster Linie die isolierten Erregungsweiterleitungen oder 1:1-Fortleitungen des Zapfensystems gehemmt werden, da ja die normalen Adaptationskurvenverläufe in der Endphase zeigten, daß die Erregungsfortleitung über die multipolaren Ganglienzellen immer unbeeinträchtigt blieben.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die 1:1 Fortleitungen der Zapfenelemente in der Fovea centralis vorwiegend dem Gestalts- bzw. Differenzie-

rungssehen dienen, würde verständlich, daß durch eine zentral-nervöse Hemmung selektiv dieser Direktfortleitungen der optognostische Apparat mit allen seinen Funktionen unzugänglich werden muß.

II. HAUPTTEIL

1. Fragestellung

Mit den mir aufgetragenen Untersuchungen sollte bei Patienten mit einseitiger Schielschwachsichtigkeit durch vergleichende Prüfungen zwischen dem jeweils amblyopen und dem zugehörigen normalsichtigen Auge festgestellt werden, ob etwaige Differenzen hinsichtlich des Farbensehens festzustellen sind.

Aus dem in der Einleitung Gesagten ging hervor, daß man heute allgemein annimmt, daß nur die Zapfenelemente der Netzhaut des amblyopen Auges nicht mehr ihrer Funktion gerecht werden können. Das Farbensehen, d.h. die Differenzierung der verschiedenen Farbtöne, gehört aber ebenfalls zu dem Aufgabenkreis der Zapfen, so daß es nahelag, zu untersuchen, ob auch diese Funktion in irgendeiner Weise eine Veränderung erfährt.

2. Methodik

Bei meinen Farbsinnuntersuchungen wurde das Nagel'sche Anomaloskop Modell II der Fa. Schmidt und Haensch benutzt, das eine sehr präzise Prüfung des Farbsinnes gestattet (Abb. 1).

In seinem Aufbau einem geradsichtigen Spektroskop gleichend, unterscheidet man am Gerät die charakteristische Dreiteilung: Das Kollimatorrohr mit dem Spaltsystem und der Vierlingsblende, dem Geradsichtprisma und dem schwenkbaren Okularrohr. Das Licht wird von einer Osram-Schmalfilmprojektionslampe geliefert, der ein Widerstand vorgeschaltet ist. Die breitflächige Adaptationsfläche unterhalb des Okularrohres gestattet dem Untersucher, den Adaptationszustand des zu prüfenden Auges am Anfang und jederzeit auch während der Untersuchung zu definieren. Die vor dem Geradsichtprisma angebrachte Gesichtsfeldblende gestattet durch die drei verschiedenen Öffnungen eine Veränderung des Gesichtsfeldes von der Größenordnung $1^{\circ}30'$ bis $3^{\circ}12'$.

Bei meinen Untersuchungen wurde die mittlere Blende von der Größe $2^{\circ}10'$ benutzt.

Die Möglichkeit mit dem Anomaloskop Mischungen mit Spektralfarben durch-

zuführen, macht man sich für Farbsinnuntersuchungen zunutze. Im Vordergrund des Anwendungsbereiches stehen die Bestimmungen der Farbanomalien und die Differenzierung der Protanomalie von der Deutanomalie. Das Anomaloskop ist so gebaut, daß das Sehfeld des Beobachters aus zwei Hälften besteht, einer oberen und einer unteren, die durch einen horizontalen Spalt getrennt sind. Dem zu untersuchenden Auge wird neben spektralem Natrium-Licht der Wellenlänge $= 589,3 \text{ m}\mu$ ein Gemisch von Lithium $= 670 \text{ m}\mu$ und Quecksilber der Wellenlänge $= 546 \text{ m}\mu$ angeboten. Die untere Sehhälfte wird für gewöhnlich mit dem monochromatischen gelben Licht beleuchtet, das der Natriumlinie entspricht. Die Intensität dieser Farbe kann durch Verstellung der Kollimatorschraube geändert werden. Die obere Hälfte des Sehfeldes wird durch zwei Spalten im Kollimatorapparat mit den beiden monochromatischen Lichtern Rot (Lithiumlinie) und Grün (Quecksilberlinie) beleuchtet. Durch Schrauben kann man die Breite der Spalten verändern, und zwar so, daß die Vergrößerung des einen Spaltes eine entsprechende Verkleinerung des anderen Spaltes nach sich zieht und umgekehrt. Die Stellung der Schraube wird an Hand einer Skala bestimmt, die in hundert Intervalle eingeteilt ist. Bei den Werten von 100 - 75 hat die Schraube in vielen Anomaloskopien einen toten Gang und nur der Spalt, der die roten Strahlen liefert, bleibt unverändert geöffnet. Die Zwischenstellungen der Schraube liefern rote und grüne Strahlung in verschiedenen Proportionen gemischt.

Der amerikanische Wissenschaftler Rayleigh machte die Feststellung, daß die Mischung der beiden monochromatischen Lichter der Lithium- und Thalliumlinie in einem bestimmten Verhältnis die gleiche Farbempfindung am farbtüchtigen Auge hervorruft wie das spektrale Natriumgelb. Später kam man zu der Erkenntnis, daß die langwelligere Quecksilberlinie mit einer Wellenlänge von $= 546 \text{ m}\mu$ anstatt der Thalliumlinie ($535 \text{ m}\mu$) mit Lithium ein noch genaueres Mischungsverhältnis darstellt und dem Farbton des Natriumgelb noch ähnlicher wird. Aus diesem Grunde wird heute gewöhnlich mit Hg-Licht gearbeitet.

Die Aufgabe, die dem Probanden am Anomaloskop gestellt wird, besteht gewöhnlich darin, Gleichheit beider Sehfeldhälften herzustellen, d.h. also Rot und Grün so zu mischen, daß für ihn dieselbe Farbempfindung wie die Vergleichsfarbe Natriumgelb entsteht.

Die Normaleinstellung, die für die Mehrzahl der farbtüchtigen Augen zutrifft, wird durch die sogenannte Rayleigh-Gleichung ausgedrückt: $\text{Li} + \text{Hg} = \text{Na}$. Ist diese Gleichung normal eingestellt, finden wir die Skalenwerte bei 40 Trommelintervallen der Mischspaltschraube (gekoppelte Spalten von Li und Hg) und 15 Intervallen der Vergleichsspaltschraube (Na - Spalt). Der Rot-

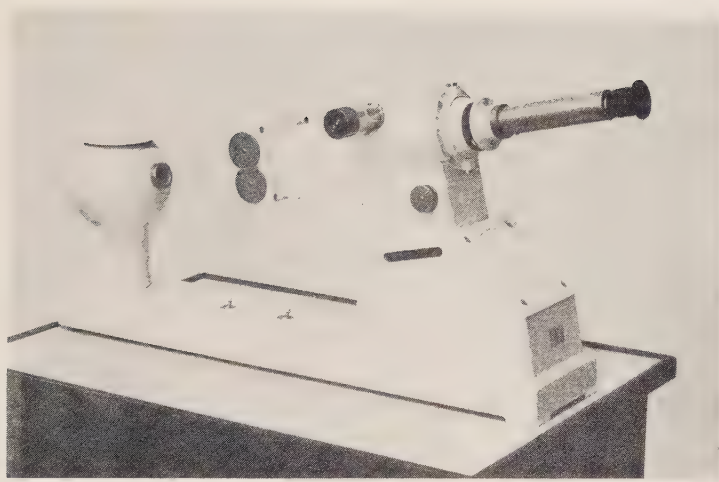


Abb. 1: Das Nagel'sche Anomaloskop Modell II

oder Grünanomale benötigt bei seiner Einstellung der subjektiven Farbgleichheit ein anderes Rot-Grün-Verhältnis. Er weicht durch seine Mischung mit einem zu großen Rot- oder Grünanteil vom Farbentüchtigen ab. Die farbenblinden Protanopen und Deutanopen erkennen zwar die Rayleigh-Gleichung an, stellen aber außerdem eine Gleichheit zwischen einer beliebigen Mischung von Rot und Grün einerseits und dem Gelb andererseits ein. Dazu ist es nur notwendig, die Helligkeit des Gelb in entsprechender Weise zu verändern. Die sogenannten Anopen- oder Extremgleichungen, die reinem Rot oder Grün die Farbe Gelb gleichsetzen, werden von den Protanopen und Deutanopen ebenfalls durch Veränderung der Helligkeit des Gelb anerkannt.

Die gefundene subjektive Farbgleichheit kann bei längerem Fixieren in deutlich merkbare Unterschiede verwandelt werden. Die Farbempfindung kann sich hinsichtlich ihres Farbtones verändern. Diese Erscheinung der Farbänderung bei langem unverändertem Fixieren des Sehfeldes wird als sogenannte Umstimmbarkeit oder "chromatische Ermüdung" bezeichnet. Bei der Untersuchung am Nagel'schen Anomaloskop unterscheidet man die absolute und relative Einstellbreite. Die absolute Einstellbreite umfaßt den Bereich der Gleichungen, die vom neutral gestimmten Auge bei einer Betrachtungszeit der einzelnen Gleichungen von nicht länger als 3 s als vollkommen gleich angenommen werden. Der absoluten Einstellbreite steht die relative gegenüber, bei deren Ermittlung der Proband das Prüffeld 15 s zu betrachten hat. In dieser Zeit kann das Auge umgestimmt werden und liefert uns dann die sogenannten Ermüdungsgleichungen.

Ausdruck der Farbsinnprüfungen am Anomaloskop ist der Anomalquotient. Der Vorschlag, als Kennzeichen der Farbtüchtigkeit und des Grades der Farbenfehlsichtigkeit den sogenannten Anomalquotienten anzugeben, stammt von Trendelenburg, da weder die Eichung der Anomaloskopschrauben noch die bei der Prüfung angewandten Lichtquellen immer übereinstimmen. Der Quotient ist durch das Verhältnis:

$$\frac{\text{relative Weite des Grünpaltes}}{\text{relative Weite des Rotspaltes}} (\text{Prüfling}) : \frac{\text{relative Weite des Grünpaltes}}{\text{relative Weite des Rotspaltes}}$$

gegeben. Er wird heute üblicherweise mit dem Spezialrechenschieber, dem sogenannten Anomalquotientenrechenschieber, errechnet. Das normale Durchschnittsauge liefert den Anomalquotienten um 1,0. Der Anomalquotient der Größen von 0,71 - 1,41 wird bei Personen festgestellt, die man noch als normale Trichromaten ansprechen kann. Mit Hilfe dieses Quotien-

ten werden schon die geringfügigsten Veränderungen des Farbensinnes deutlich. Für Deuteranomale wird dieser Quotient größer als 1, für Protanomale kleiner. In der Literatur werden für die Farbenfehlsichtigkeit folgende Anomalquotienten als charakteristisch angeführt:

Protanomale	0,6 - 0,7
normale Trichromaten	0,7 - 1,4
Deuteranomale	2,0 - 20,0

Bei der Farbenasthenopie ist der Anomalquotient der gleiche wie beim normalen Trichromaten. Die Farbenasthenopen stellen sicher ein, sind aber umstimmbare.

Bei meinem untersuchten Krankengut handelte es sich um 40 Patienten im Alter von 6 - 24 Jahren mit verschiedenen Graden von Amblyopie. Die Visus sind in der angegebenen Tabelle und der Kasuistik zu entnehmen. Die Versuchsanordnung und der Gang der Untersuchung war folgender:

Der Prüfling saß in angemessener Höhe bequem vor dem Gerätetisch. Der Kopf war durch eine angebrachte Kinnstütze in bestimmter Lage fixiert, um die Änderung des Schwinkels auf das Prüffeld zu verhindern. Nach einer 5 s langen Betrachtung der Adaptationsfläche war das zu untersuchende Auge helladaptiert. Das andere Auge wurde abgedeckt.

Zunächst wurde dem Patienten eine Normalgleichung angeboten (40/15), die entweder angenommen oder abgelehnt werden konnte. Anschließend ließen wir anomale Gleichungen (20/15, 60/15) und Anopen- bzw. Extremgleichungen (73/15, 0/15) beurteilen. Die wichtigsten Angaben waren aber die Einstellungen der Rayleigh-Gleichung durch den Patienten selbst. Der Proband wurde aufgefordert, beim Auffinden der Farbgleichheit nur die Mischspaltschraube zu verstellen. Die Vergleichsspaltschraube war auf das Trommelintervall von 15 eingestellt. Vom Patienten wurden 8 - 10 Selbsteinstellungen vorgenommen, zwischen denen jedesmal vor der Neueinstellung zur Aufrechterhaltung der Neutralstimmung des Auges die Adaptationsfläche betrachtet wurde. Die absolute Einstellbreite, bei der die Betrachtungszeit der einzelnen Gleichungen nicht länger als 3 s in Anspruch nehmen sollen, wurde von der relativen Einstellbreite getrennt. Bei letzterer wird zur Ermittlung der Ermüdungsgleichungen das Prüffeld mindestens 15 s lang betrachtet.

Aus den 8 Selbsteinstellungen des Patienten wurde das arithmetische Mittel und aus diesem der Anomalquotient errechnet. Durch den Vergleich der Anomalquotienten der amblyopen mit den zugehörigen normalsichtigen Augen ist es möglich, die Farbtüchtigkeit des schwachsichtigen Auges sehr genau zu beurteilen.

Von eingeweihter Seite könnte man die Tatsache bemängeln, daß man bei vergleichenden Untersuchungen an normalen und amblyopen Augen nicht von den gleichen Voraussetzungen ausgeht. Durch den Verlust der zentralen Fixation wird der Proband bei Einstellung der Rayleigh-Gleichung versuchen, mit dem Netzhautanteil zu fixieren, der ihm noch das beste Auflösungsvermögen gewährt. Wir untersuchen dann nicht die gleichen Netzhautstellen - also keine vergleichbaren Areale. Für eine Farbsinnprüfung spielt aber diese Tatsache nur eine untergeordnete Rolle, da man berücksichtigen muß, daß die Farbe Rot im Zentrum der Fovea ebenso rot ist wie in peripheren Gebieten.

Für die Farbempfindung spielt die Leuchtdichte und Ausdehnung des Beobachtungsfeldes eine beträchtliche Rolle. Hartridge und A. König konnten aber durch eingehende Untersuchungen zeigen, daß beim parazentralen und peripheren Sehen grundsätzlich die gleichen Verhältnisse bestimmend sind. Lediglich der Sehwinkel und damit die angebotenen Objekte bedürfen in den periphereren Gebieten gegenüber den fovealen einer Größenzunahme. Um eine derartige Fehlerquelle auszuschließen, wurde aber bei unseren Farbsinnuntersuchungen ein relativ großes Gesichtsfeld gewählt ($20^{\circ} 10'$).

3. Untersuchungsergebnisse

a) Kasuistik

Pat. Nr. 1, P.F. $\bar{O}$, 9 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/35

L: 5/5

Fixation: I - 2° nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

OP: Externus-Vorlagerung

Pat. Nr. 2, M. B., $\bar{O}$, 9 J.,

Strab. conv. conc. (seit 2. Lj.), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/50

L: 5/5

Fixation: 4- 5° nasal

Therapie: Pleoptische B.

OP: Komb. Vor-Rücklagerung

Pat. Nr.3, H.E., $\overset{+}{O}$, 15 J.,
Strab. conv. conc. mon. (seit Geburt), Amblyopie LA,
Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4
L: 5/35

Fixation: 3⁰ nasal
Therapie: Pleoptische B.

Pat. Nr.4, C.G., $\overset{+}{O}$, 12 J.,
Strab. conv. conc. (seit 2. Lj.), Amblyopie LA,
Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4
L: 5/35

Fixation: 3-5⁰ nasal
Therapie: Pleoptische B.

Pat. Nr.5, K.K., $\overset{+}{O}$, 9 J.,
Amblyopie LA
Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4
L: 5/35

Fixation: 0-1⁰ nasal
Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr.6, H.S., $\overset{+}{O}$, 10 J.,
Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,
Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5
L: 5/50

Fixation: 0-1⁰ nasal
Therapie: Pleoptische B.
OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.7, G.H. $\overset{+}{O}$, 6 J.,
Amblyopie RA
Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/10
L: 5/4

Fixation: 2-3⁰ nasal
Therapie: Pleoptische B.

Pat. Nr.8, G.R., $\overset{+}{O}$, 6 J.,
Strab. conv. conc. (seit 1. Lj.), Amblyopie RA,
Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/50
L: 5/5

Fixation: 2⁰ nasal
Therapie: Pleoptische B.
OP: Internus-Rücklagerung RA

Pat. Nr.9, G.R. $\hat{O}$, 10 J.,

Strab. conv. conc. (seit 3. Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/100

Fixation: 10-12° temporal

Therapie: Pleoptische B.

OP: Internus-Rücklagerung

Pat. Nr.10, U.L., $\hat{O}$, 7 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5,

L: 5/50

Fixation: 7° nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr.11, S.H., $\hat{O}$, 6. J.,

Strab. conv. conc. (seit 1. Lj.), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/25

L: 5/5

Fixation: 5° nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr.12, R.K., $\hat{O}$, 8 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/25

Fixation: 5° nasal

Therapie: Pleoptische B.

Pat. Nr.13, G.L., $\hat{O}$, 9 J.,

Strab. conv. conc., Amblyopie RA,

Visus zu Beginn der Behandlung: R: 5/25

L: 5/5

Fixation: 2-3° temporal

Therapie: Orthoptische und pleoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.14, R.S., $\hat{O}$, 7 J.,

Strab. conv. conc. (seit etwa 2 J.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/35

Fixation: parafoveolär

Therapie: Orthoptische B.

Pat. Nr. 15, E. G., $\overset{+}{\text{O}}$, 13 J.,

Amblyopie LA

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/35

Fixation: 0-2° nasal

Therapie: Orthoptische B.

Pat. Nr. 16, R. B., $\overset{+}{\text{O}}$, 23 J.,

Amblyopie RA

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/35

L: 5/5

Fixation: 4-5° nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr. 17, W. L., $\overset{\uparrow}{\text{O}}$, 8 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/50

Fixation: 4-5° nasal

Therapie: Pleoptische Behandlung

Pat. Nr. 18, C. B., $\overset{+}{\text{O}}$, 7 J.,

Strab. div. (seit Geburt), Amblyopie RA

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/15

L: 5/5

Fixation: 4° nasal

Therapie: Orthoptische und pleoptische B.

OP: Komb. Vor-Rücklagerung

Pat. Nr. 19, G. R., $\overset{+}{\text{O}}$, 7 J.,

Strab. conv. conc. (seit 4. Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/7

Fixation: unruhig zentral

Therapie: Orthoptische und pleoptische B.

II. OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

II. OP: Internus-Rücklagerung

Pat. Nr. 20, G. K., $\overset{\uparrow}{\text{O}}$, 8 J.,

Strab. conc. conv. (seit 1. Lj.), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/50

L: 5/4

Fixation: keine F.

Therapie: Pleoptische B. OP: Komb. Vor-Rücklagerung

Pat. Nr.21, G.K., $\overset{+}{O}$, 15 J.,

Strab. conv. conc. (seit 2 J.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/50

Fixation: 10° unten

Therapie: Pleoptische B.

OP: Komb. Vor-Rücklagerung

Pat. Nr.22, C.K., $\overset{+}{O}$, 9 J.,

Strab. conv. conc. (seit 3. Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/20

Fixation: 8° unten

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr.23, U.S., $\overset{+}{O}$, 10 J.,

Strab. conv. conc. mon. (seit Geburt), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/50

L: 5/5

Fixation: 4-5° nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.24, G.W., $\overset{+}{O}$, 12 J.,

Strab. conv. conc. (seit 1. Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/50

Fixation: parafoveolär 2-3°

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr.25, S.S., $\overset{\uparrow}{O}$, 18 J.,

Strab. conv. conc. (seit Kindheit), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/35

Fixation: parafoveolär 2-3°

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr.26, R.V., $\overset{+}{O}$, 13 J.,

Strab. conv. conc. (seit 3.-4. Lj.), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/50

L: 5/4

Fixation: 2° oben

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr. 27, D. G. ♂, 13 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/35

Fixation: 3-4⁰ nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

OP: Internus-Rücklagerung

Pat. Nr. 28, R. K., ♂, 9 J.,

Strab. conv. conc. (seit 3.-4. Lj.), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/20

L: 5/5

Fixation: 2-3⁰ nasal

Therapie: Orthoptische und pleoptische B.

Pat. Nr. 29, M. W., ♂, 12 J.,

Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/25

Fixation: 3-5⁰ nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr. 30, H. R., ♂, 12 J.,

Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/15

L: 5/7

Fixation: 4-5⁰ nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr. 31, E. R., ♂, 10 J.,

Strab. conv. conc. (seit 4 J.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/20

Fixation: 1⁰ nasal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

OP: Internus-Rücklagerung

Pat. Nr. 32, D. R., ♂, 17 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/20

Fixation: 2-3⁰ nasal

Therapie: Orthoptische und pleoptische Behandlung

Pat. Nr.33, T.G., ♂, 7 J.,

Strab. conv. conc. mon. (seit dem 1.Lj.), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/25

L: 5/5

Fixation: parapapillär

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.34, H.F., ♂, 10 J.,

Strab. conv. conc. mon. (seit 3 Jahren), Amblyopie RA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/20

L: 5/5

Fixation: unruhig zentral

Therapie: Orthoptische und pleoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.35, E.S., ♂, 7 J.,

Strab. conv. conc. mon., Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/50

Fixation: 5-6° nasal

Therapie: Orthoptische und pleoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.36, W.B., ♂, 13 J.,

Strab. conv. conc. (seit Geburt), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/35

Fixation: 0-2° nasal

Therapie: Orthoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr.37, C.P., ♂, 12 J.,

Strab. div. conc. mon. (seit 1.Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/25

Fixation: parafoveolär

Therapie: Orthoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

Pat. Nr. 38, D.E., ♂, 12 J.,

Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/35

Fixation: 0-1⁰ nasal

Therapie: Pleoptische B.

Pat. Nr. 39, E.B., ♂, 10 J.,

Strab. conc. conv. (seit 2. Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/4

L: 5/20

Fixation: 1-2⁰ nasal

Therapie: pleoptische und orthoptische B.

Pat. Nr. 40, E.K., ♂, 8 J.,

Strab. conv. conc. (seit 4. Lj.), Amblyopie LA,

Visus zu Behandlungsbeginn: R: 5/5

L: 5/25

Fixation: 3⁰ temporal

Therapie: Pleoptische und orthoptische B.

OP: Komb. Vor- und Rücklagerung

b) Tabellarische Zusammenstellung

Pat. Nr.	Visus gesund amblyop	MNG 40/15	Arithm. Mittel der SelbstEinst.	Anomal- quotient	Protanomale Gl.		Extremgl.	
					20/15	60/15	0/15	73/15
1	5/5	==	40,7	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	39,3	1,04	Ø	Ø	Ø	Ø
2	5/4	==	41,6	0,92	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/20	==	40,0	1,00	Ø	Ø	Ø	Ø
3	5/4	==	43,7	0,82	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	48,9	0,65	Ø	Ø	Ø	Ø
4	5/5	==	40,3	0,98	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	43,0	0,84	Ø	Ø	Ø	Ø
5	5/4	==	40,7	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	38,5	1,09	Ø	Ø	Ø	Ø
6	5/5	==	40,7	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/20	==	39,7	1,02	Ø	Ø	Ø	Ø
7	5/4	==	41,7	0,92	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/10	==	39,5	1,03	Ø	Ø	Ø	Ø
8	5/5	==	41,6	0,92	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/15	==	42,1	0,88	Ø	Ø	Ø	Ø
9	5/5	==	41,1	0,94	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	38,8	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø
10	5/5	==	40,8	0,96	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/50	==	42,3	0,88	Ø	Ø	Ø	Ø
11.	5/4	==	41,8	0,91	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	39,1	1,05	Ø	Ø	Ø	Ø
12	5/7	==	39,1	1,05	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/20	==	43,0	0,84	Ø	Ø	Ø	Ø
13	5/5	==	40,0	1,00	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/50	==	38,8	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø
14	5/4	==	39,0	1,06	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	38,1	1,10	Ø	Ø	Ø	Ø
15	5/4	==	39,0	1,06	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	38,7	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø
16	5/5	==	42,1	0,88	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	45,1	0,75	Ø	Ø	Ø	Ø
17	5/7	==	43,0	0,84	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/50	==	44,0	0,80	Ø	Ø	Ø	Ø

Pat. Nr.	Visus gesund amblyop	MNG 40/15	Arithm. Mittel der Selbsteinst.	Anomal- quotient	Protanomale Gl.		Extremgl.	
					20/15	60/15	0/15	73/15
18	5/5	==	40,6	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	40,8	0,96	Ø	Ø	Ø	Ø
19	5/4	==	42,3	0,88	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	41,2	0,93	Ø	Ø	Ø	Ø
20	5/5	==	42,1	0,88	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	43,0	0,84	Ø	Ø	Ø	Ø
21	5/4	==	39,1	1,05	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/20	==	44,0	0,80	Ø	Ø	Ø	Ø
22	5/7	==	40,1	0,99	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/10	==	42,8	0,86	Ø	Ø	Ø	Ø
23	5/4	==	41,8	0,91	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/10	==	43,8	0,82	Ø	Ø	Ø	Ø
24	5/5	==	40,3	0,98	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/25	==	41,8	0,91	Ø	Ø	Ø	Ø
25	5/5	==	38,7	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	39,7	1,02	Ø	Ø	Ø	Ø
26	5/4	==	38,6	1,09	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/50	==	38,8	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø
27	5/4	==	39,1	1,05	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	42,5	0,87	Ø	Ø	Ø	Ø
28	5/4	==	41,1	0,94	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	43,3	0,83	Ø	Ø	Ø	Ø
29	5/5	==	41,3	0,93	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	40,1	0,99	Ø	Ø	Ø	Ø
30	5/5	==	42,5	0,87	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/10	==	44,1	0,79	Ø	Ø	Ø	Ø
31	5/5	==	40,6	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/10	==	37,5	1,15	Ø	Ø	Ø	Ø
32	5/5	==	40,6	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/20	==	40,6	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
33	5/5	==	40,1	0,99	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/50	==	45,8	0,73	Ø	Ø	Ø	Ø
34	5/5	==	40,2	0,98	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/25	==	40,2	0,98	Ø	Ø	Ø	Ø
35	5/5	==	38,7	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/50	==	41,1	0,93	Ø	Ø	Ø	Ø

Pat. Nr.	Visus gesund amblyop	MNG 40/15	Arithm. Mittel der Selbsteinst.	Anomal- quotient	Protanomale Gl.		Extremgl.	
					20/15	60/15	0/15	73/15
36	5/5	==	39,8	1,02	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	40,6	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
37	5/5	==	42,0	0,89	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/10	==	41,9	0,91	Ø	Ø	Ø	Ø
38	5/5	==	40,6	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	41,1	0,93	Ø	Ø	Ø	Ø
39	5/5	==	40,5	0,97	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/35	==	39,1	1,05	Ø	Ø	Ø	Ø
40	5/5	==	41,8	0,91	Ø	Ø	Ø	Ø
	5/7	==	38,8	1,08	Ø	Ø	Ø	Ø

Zeichenerklärung: == Gleichung angenommen
 Ø Gleichung abgelehnt

c) Besprechung der Ergebnisse

An Hand der Untersuchungsergebnisse und anschließender Berechnungen zeigte es sich, daß das funktionell schwachsichtige Auge im vollen Besitz seines Farbensinnes ist. Aus den geringfügigen Abweichungen, sogar bei hochgradigen Formen der Amblyopie, geht eindeutig hervor, daß die Fähigkeit zur Differenzierung der einzelnen Farbtöne bei der funktionellen Schwachsichtigkeit nicht verloren geht. Am Anomaloskop wurden von den Prüflingen alle angebotenen Mittelnormgleichungen angenommen, alle anomalen und anopen Gleichungen jedoch abgelehnt. Aus den durchschnittlichen Selbsteinstellungen ergaben sich auf Grund der statistischen Berechnungen folgende Werte:

Die amblyopen Augen liefern bei der Einstellung der Rayleigh-Gleichung einen Mittelwert der Anomalquotienten von $0,94 \pm 0,054$. Der Durchschnittswert der Anomalquotienten der normalsichtigen Augen liegt in einer Höhe von $0,963 \pm 0,036$. Diese Zahlen bedeuten, daß der Patient für die Herstellung der Farbgleichheit beider Halbfelder mit seinem schwachsichtigen Auge an der Mischspaltschraube ein Trommelintervall von 41,1 mit seinem gesunden Auge von 40,8 einstellte. Bei der Beurteilung der absoluten Einstellbreite wird eine Streuung von 1-5 Teilstrichen noch als sichere Einstellung

angesehen. Das amblyope Auge zeigt im Durchschnitt die geringe Abweichung von 1,1 Teilstrichen von dem idealen Wert 40 und liegt damit noch in dem Bereich der sicheren Einstellung. Sogar bei hochgradigem Verlust des Seh- und Auflösungsvermögens mit Visuswerten von 5/35 und 5/50 liefern die Farbsinnprüfungen Anomalquotienten z.B. von 1,02 und 0,93. Umgerechnet besagen diese Quotienten, daß das amblyope Auge mit einem Visus von 5/35 seine Rayleigh-Gleichung bei einem Mischspaltschraubenwert von 39,7 mit einem Visus von 5/50 bei 41,1 einstellt, also nur ganz geringfügige Abweichungen zu dem Idealwert zeigen.

Der statistische Vergleich der beiden Mittelwerte 0,963 und 0,94 ergibt keine signifikanten Unterschiede. Ihre Differenz von 0,023 ist nicht viel größer als der Standardfehler beider Mittelwerte von 0,022 (der nach statistischen Erfahrungen das Dreifache der Differenz betragen darf, um noch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,3% urteilen zu können). Es kann also mit Sicherheit ausgesagt werden, daß der Unterschied der Mittelwerte von 0,023 keine echte Abweichung darstellt.

Berücksichtigt man von jedem Prüfling die Differenz der Anomalquotienten zwischen beiden Augen und bildet aus der Summe der Probanden den Mittelwert dieser Differenzen, errechnet sich ein Mittelwert von 0,094, d.h. das amblyope Auge zeigt im Durchschnitt die geringe Abweichung von 0,094 zu dem normalsichtigen Auge. Dabei handelt es sich um positive und negative Werte. Diese Abweichungen sind aber nicht durch die Amblyopie bedingt, da man die Tatsache in Betracht ziehen muß, daß gesunde Augen mit vollem Visus ebenfalls derartig geringe Abweichungen bei ihren Einstellungen aufweisen. Um hier einen Vergleich zu haben, wurden noch 20 vollkommen normalsichtige Versuchspersonen mit einem beidäugigen Visus von 5/5 in gleicher Weise durchuntersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen zeigte es sich, daß das linke Auge im Vergleich zum rechten des gleichen Probanden ebenfalls geringe Abweichungen bei den Einstellungen der Rayleigh-Gleichung aufwies. So ergab sich für das rechte Auge ein Anomalquotient von 0,984, für das linke von 0,97. Analog obiger Berechnungen ergibt der Mittelwert der Differenzen zwischen den Anomalquotienten einen Wert von 0,092. Er zeigt damit zu dem gefundenen Mittelwert der Amblyopen von 0,094 fast keinen Unterschied.

Beurteilt man aus den Farbsinnprüfungen die relative Einstellbreite, zeigt sich ein Fehlen von Ermüdung und Umstimmbarkeit. Die Patienten gaben bei längerer Fixation des Prüffeldes keine Änderung ihrer gefundenen Farbgleichheit an.

Zusammenfassend sagen uns die Untersuchungen: Das amblyope Auge besitzt

die vollständige Fähigkeit, die verschiedenen Farben hinsichtlich des Farbtones zu differenzieren; es kann seiner Funktion, Lichter verschiedener Wellenlänge zu unterscheiden und in spezifischer Weise zu empfinden, noch voll gerecht werden. Es stellt am Nagel'schen Anomaloskop sicher ein und ist nicht umstimmbare.

Von Bedeutung wären hier vielleicht vergleichende Untersuchungen an amblyopen und normalsichtigen Augen, die sich auf den Sättigungsgrad der verschiedenen Farben beziehen. Die Sättigung zählt neben der Helligkeit und dem Farbton zu den Grundcharakteristika einer chromatischen Farbe. Unter Sättigung versteht man das Verhältnis der farbigen zur unbunten Komponente. Eine Farbe ist desto gesättigter, je weniger sie von dem Weißanteil besitzt. Obwohl die Fähigkeit, chromatische Empfindungen auszulösen, eine Funktion des Zapfenapparates ist, sind in der Gegenwart Tatsachen festgestellt worden, die zu der Annahme Veranlassung geben, daß man auch innerhalb der Grenzen des Zapfensehens verschiedene anatomisch-physiologische Substrate für die Empfindung der Helligkeit der Farben, des Farbtones und der Sättigung annehmen muß. Auf Näheres über die modernsten Anschauungen von dem Vorhandensein verschiedener Zapfenarten mit spezifischen Funktionen wird später noch eingegangen. In diesem Zusammenhang besteht aber in vergleichenden Untersuchungen amblyoper und gesunder Augen, die den Sättigungsgrad der verschiedenen Farben zum Inhalt haben, die Möglichkeit, daß man auf diesem Gebiet bei der Amblyopie irgendwelche auffallenden Differenzen feststellen könnte.

Im folgenden soll der Versuch gemacht werden, die Tatsache des intakten Farbensinnes bei der funktionellen Schwachsichtigkeit, wenn auch nicht völlig zu erklären, so doch einem Verständnis näher zu bringen. Was vor allem einer Erörterung bedarf, ist die Frage, aus welchen Gründen ein amblyopes Auge bezüglich der Funktionen seines Zapfenapparates, auf der einen Seite des farblosen Sehens, auf der anderen der Differenzierung von Lichtern verschiedener Wellenlängen nur teilweise nicht mehr gerecht werden kann. Die Annahme, daß nur das calcarine Sehzentrum, das das Gebiet der Area striata umfaßt, in das zentral-nervöse Hemmungsgeschehen einbezogen ist, dagegen aber das Farbensehzentrum mit einem hypothetisch anzunehmenden eigenen zentralen Bezirk nicht betroffen wird, ist unwahrscheinlich und würde uns nur eine unbefriedigende Antwort auf die Frage geben. Es wird zwar angenommen, daß der anatomische Apparat des Farbensehens im Gehirn in gewissem Maße von dem der Helligkeitsempfindung abgesondert ist. So hat z. B. der russische Wissenschaftler Krawkow auf zwei Gehirnverletzte hingewiesen, die er in den Kriegsjahren beobachten

konnten, bei denen infolge ihrer Hirnverletzung die Farbempfindung verlorengegangen war, während die Fähigkeit, mit Hilfe des Zapfenapparates die weiße Farbe zu erkennen und das Stäbchen- und Dämmerungssehen erhalten blieb. Krawkow wies bezüglich dieser beiden Verletzten ausdrücklich darauf hin, daß es zuverlässig bekannt war, daß die Betroffenen vor der Verletzung über einen gesunden Farbensinn verfügten und ihn erst nach dem Hirntrauma verloren hatten. Nach Krawkow sollen in der Literatur schon mehrere solcher Fälle beschrieben worden sein. Der Verlust der Farbenempfindung bei erhaltener Helligkeitsempfindung umfaßt manchmal nur eine Hälfte des Sehfeldes und trägt dann die Bezeichnung Hemiachromatopsie. Die Existenz des spezifischen Farbenzentrums ist jedoch noch nicht bewiesen worden und über eine etwaige genauere Lokalisation ist ebenfalls nichts bekannt.

4. Überblick über Theorien des Farbensehens

Für eine Klärung der angeschnittenen Frage ist es notwendig, die Theorien der Farbempfindung heranzuziehen. Es läßt sich deshalb eine Erörterung der gegenwärtig anerkanntesten Farbsinntheorien nicht umgehen. Von einer akzeptablen Theorie wäre zu fordern, daß sie den Tatsachen der Farbenmischung und der Existenz von 4 Urfarben gerecht wird und die Farbenanomalien zu deuten vermöchte.

Den Gesetzen der Farbenmischung wird am besten eine Hypothese gerecht, die drei verschiedene Rezeptoren annimmt. Eine solche wurde bereits im vorigen Jahrhundert von Young (1802) aufgestellt und von Helmholtz (1852) weiter ausgebaut. Diese Theorie nimmt drei verschiedene Farbrezeptoren in der Retina an, die auf eine bestimmte Wellenlänge besonders erregt werden. Die erste Rezeptorenart soll also hauptsächlich von langwelligen, die zweite von mittelwelligen und die dritte von kurzwelligen Lichtern erregt werden. Eine bestimmte Wellenlänge wirke aber immer, wenn auch im geringeren Umfange, auf alle drei Rezeptorenarten. Durch diese Tatsache gäbe es keine volle Sättigung, denn durch das gleichzeitige Zersetzen aller Sehsubstanzen sei immer ein Weißanteil beigemischt. Schwarz beruhe auf dem Fehlen jeglicher Erregung. Die Farbenmischungen entstünden durch die gleichstarke Erregung zweier Rezeptoren.

Diese Drei-Rezeptoren-Hypothese von Helmholtz ist aber nicht in der Lage, alle das Farbensehen betreffenden Erscheinungen zu erklären. Die Mängel der Theorie liegen vor allem darin, daß es bis zum heutigen Tage noch nicht gelungen ist, die Existenz von drei verschiedenen Zapfenarten oder Seh-

stoffen sicher nachzuweisen. Es sind zwar Versuche unternommen worden (Bezold, v. Studnitz), die Drei-Rezeptoren-Hypothese in eine Drei-Sehstoff-Theorie umzuwandeln, aber die Behauptung v. Studnitz', daß er drei verschiedene Sehstoffe habe isolieren können, konnte bis heute von keiner anderen Seite bestätigt werden. Da das Vorhandensein von drei verschiedenen Sehstoffen in einem Rezeptor und die Reizverarbeitung mehrerer untereinander verschiedener Reize in Form von Lichtern bestimmter Wellenlängen von einem Rezeptor in offensichtlichem Widerspruch mit dem Müller'schen Gesetz der spezifischen Sinneserregung, dem Alles-oder-Nichts-gesetz der modernen Nervenphysiologie steht, wird die Behauptung v. Studnitz' sogar von vielen Seiten vollkommen abgelehnt.

Die Young-Helmholtz'sche Theorie sieht sich noch einer weiteren Schwierigkeit gegenüber, und zwar ist sie nicht imstande, die Farbenanomalien und Anopien zufriedenstellend zu deuten. Da nach Helmholtz eine bestimmte Wellenlänge immer alle Sehstoffe zugleich erregt, wenn auch je nach spezifischem Lichtreiz in verschiedenem Umfange, wird jede Farbempfindung einen gewissen Weißanteil besitzen. Faßt man nach Helmholtz die Farbenblindheit als Unterfunktion oder Ausfall der entsprechenden Sehsubstanz auf, dürfte ein Protanoper auch keine Weißempfindung mehr besitzen, da ja durch den Wegfall des für die Farbe Rot spezifischen Sehstoffes nicht mehr alle Sehsubstanzen gleichzeitig zersetzt werden können, was nach Helmholtz die Voraussetzung für eine Weißempfindung bildet.

Neben diesen beiden Hauptmängeln der Young-Helmholtz'schen Dreikomponententheorie findet sie auch keine umfassende Erklärung für die Farbunabhängigkeit des Auflösungsvermögens der Netzhaut und deutet die Entstehung des Simultankontrastes als Urteilstäuschung nicht befriedigend.

Trotz der vielen Schwächen der Dreikomponententheorie neigt man ihr in der modernen Sinnesphysiologie heute noch viel eher zu als dem Bezold'schen Drei-Sehstoff-Einrezeptorsystem. Heute, etwa 100 Jahre nach Entstehung der Young-Helmholtz'schen Theorie kann man vielleicht sagen, daß sie der Retina ein zu starres System unterstellt und noch zu wenig die Möglichkeiten für die verschiedenen Schaltmechanismen in der Retina und die Funktion der Sinneselemente in unterschiedlich geschalteten rezeptiven Feldern beachtet hat.

Die im Jahre 1878 von Hering aufgestellte Theorie geht von der Behauptung aus, daß Farbenempfindung durch Auf- und Abbauvorgänge der Sehsubstanzen ausgelöst werden und von der Existenz dreier Farbsubstanzen für je

ein Farbenpaar, Weiß-Schwarz, Rot-Grün und Gelb-Blau. Durch die dissimilatorischen Vorgänge sollen die hellen Farben Weiß, Rot, Gelb, die assimilatorischen die dunklen Farben Schwarz, Grün, Blau hervorgerufen werden. Die erste Sehsubstanz liefere bei einem Gleichgewicht der aufbauenden und abbauenden Vorgänge die Farbe Grau. Hering nennt die bei der zweiten und dritten Substanz auftretenden Farbempfindungen Gegenfarben, da gewisse Strahlen entweder aufbauend oder abbauend wirken sollen. Da Licht jeder Wellenlänge, wenn auch in vermindertem Umfang, auch die erste Substanz erzeuge, sei bei jeder Farbempfindung ein Weißanteil vorhanden. Höben sich aber auf Grund gleichartiger assimilatorischer und dissimilatorischer Prozesse der zweiten oder dritten Substanz die Farben auf, entstehe nur eine Weißempfindung. Die Hering'sche Theorie zeigt gegenüber der Dreikomponententheorie von Young u. Helmholtz keine Verbesserungen und ist von ähnlichen Mängeln behaftet.

Neben diesen beiden großen Theorien des Farbensehens sind in der Folgezeit noch viele andere Versuche unternommen worden, das Farbensehen zu erklären. Alle Theorien sind aber wieder schnell in Vergessenheit geraten und konnten nur dann längeren Bestand haben, wenn sie sich entweder direkt an eine der beiden großen Theorien anlehnten oder eine Verknüpfung von ihnen darstellten.

Die Zonentheorie von Kries versucht, die beiden Theorien zu vereinen, indem die peripheren Vorgänge mehr nach Helmholtz, die zentralen nach Hering gedeutet werden. Das Sehorgan wird von ihm durch verschiedene hintereinander geschaltete Abteilungen dargestellt, wobei der periphere im Auge beginnende Abschnitt der direkten Einwirkung der Lichtstrahlen im Sinne der Dreikomponententheorie, der cerebrale Abschnitt dem Umsatz in die einzelnen Farbempfindungen im Sinne der Gegenfarbentheorie dient. Auch diese Theorie stellt zur Klärung der Natur des Farbensehens keine wesentlichen Fortschritte dar.

In neuester Zeit ist von Cibis der Versuch unternommen worden, ein Modell des Farbenwahrnehmungsvorganges darzustellen, welches die beiden grundlegenden Theorien des Farbensehens, die Young-Helmholtz'sche Dreikomponententheorie und die Hering'sche Vierfarbentheorie im Sinne der von Kries'schen Zonentheorie verbinden soll. In dieser Theorie werden völlig neue Gesichtspunkte aufgeworfen. Cibis zieht zu seinen Erklärungen des Sehvorganges die moderne Quantenoptik heran. Nach seinen Anschauungen wird jeder Lichtreiz zunächst in der lichtempfindlichen Substanz absorbiert. Die Resonatoren, die sich in dem lichtabsorbierenden Sehstoff befänden und

eine gewisse Eigenschwingung hätten, gerieten bei der Absorption entsprechender Lichtstrahlen in Mitschwingung (Planck). Dabei erführe das ganze System Veränderungen, die sich auf die Elektronen und Atomkernbahnen beziehen sollen, wodurch das Elementarsystem eine Veränderung seiner Energie erfahre. Diese Energie soll der Wellenlänge der Strahlen, die gerade absorbiert worden sind, umgekehrt proportional sein. Die ständige Änderung der Energieverhältnisse des Elementarsystems bei der Differenzierung von chromatischen Farben, entweder Zuwachs oder Verlust, verursache biologisch wirksame Reaktionen, die sich physiologisch als elektrische Aktionsströme nachweisen ließen.

Auch Cibus nimmt 3 verschiedene Arten von Photorezeptoren in der Netzhaut an, x_s , y_s und z_s . Diese drei lichtempfindlichen Elemente sollen mit wirkungsvollen Anteilen in verschiedener Weise auf die Zapfen verteilt sein. So enthalte das Zapfensystem I nur die Rezeptorenkomponenten x_s und y_s , das Zapfensystem II y_s und endlich das Zapfensystem III die Komponenten y_s und z_s . Die Photorezeptoren der Netzhaut sollen sich nur durch die antagonistische Wirksamkeit der in einem Element vereinten Substanzen, nicht aber durch Assimilation und Dissimilation der gleichen Substanz im Sinne Hering's unterscheiden. Werden durch auftreffende Strahlungen die photosensible Substanz in einem der Sehelemente aktiviert, komme es zu Polarisationsvorgängen und Ionenkonzentrationsverschiebungen bis in die terminale Ganglienzelle. Auch nach seinen Anschauungen soll allen Farben Weiß beigemischt sein, das allein übrig bleiben könne, wenn sich die Buntempfindungen aufhoben.

Die Theorie von Cibus, die sich nur auf bekannte Tatsachen stützt, ist in der Lage, viele Erscheinungen des Farbensehens besser zu erklären, aber sie scheint vorläufig nur ein theoretisches Modell darzustellen. Bis heute ist sie in noch keinem Punkt widerlegt worden, aber noch viel zu jung, um ein abschließendes Urteil über sie zu bilden.

Eine fundamentale Grundlage erhielt die Dreikomponententheorie durch die elektrophysiologischen Versuche von Granit, die man als einen direkten physiologischen Beweis für die Richtigkeit ihrer Grundthesen ansehen kann. Nach Reizung der Netzhaut von Fröschen und Katzen durch Licht verschiedener Wellenlängen wurden in seinen Versuchen die elektrischen Potentiale, die sog. "Aktionsströme", mittels einer Mikroelektrode an der freigelegten Netzhaut abgeleitet. Es gelang, die Aktionsströme einzelner Nervenfasern des Sehnervens abzuleiten und die Schwellenintensität verschiedener Lichtreize oszillographisch zu bestimmen. Dadurch war es möglich, die Empfindlichkeit der Netzhautrezeptoren, die mit den bestimmten Nervenfasern

in Verbindung standen, zu messen. Die gewonnenen Aktionsspektren wurden als Empfindlichkeitskurven dargestellt, in denen die Abszissen durch die Wellenlängen des energiegelichen Spektrums, die Ordinaten von den reziproken Schwellenwerten des maximalen Empfindlichkeitswertes gebildet wurden. Für das helladaptierte Auge erhielt Granit und seine Mitarbeiter eine breite glockenförmige Kurve, die das ganze sichtbare Spektrum umfaßte und ihr Maximum bei der Wellenlänge von $497\text{ m}\mu$ hatte. Die Rezeptoren der Netzhaut, die diese Art der Empfindlichkeitskurven bedingen, nannte Granit Dominatoren. Daneben wurden im Rahmen dieser Untersuchungen weitere drei glockenförmige Kurven erhalten, die je nur einen begrenzten Bereich des Spektrums umfassen und ihr Maximum entweder im Bereich des Rot (etwa $600\text{ m}\mu$), des Grün (etwa $530\text{ m}\mu$) und im Bereich des Indigo (etwa $460\text{ m}\mu$) haben. Diese Rezeptoren, die eigentlichen Vermittler der Farbempfindung, nannte Granit Modulatoren. Durch die Tatsache der Einteilung der Netzhautrezeptoren in drei Gruppen mit Empfindlichkeitsmaxima im Roten, Grünen und Indigo, kann man nicht umhin, hier eine gewisse Bestätigung der angeführten Grundthesen zu erblicken.

Hartridge geht mit seiner Forderung noch über Granit hinaus und verlangt mindestens 7 verschiedene Rezeptorenarten in der Netzhaut. Dabei hat er aber die Möglichkeit offengelassen, daß man diese Rezeptoren in drei große Hauptgruppen zusammenfassen könne. Dann würde seine Rezeptorentheorie nur eine Verfeinerung und Erweiterung der Young-Helmholtz'schen Dreikomponententheorie darstellen.

Ungeachtet dessen bleibt bezüglich der Natur des Farbensehens noch vieles ungeklärt. Es ist bisher weder gelungen, einen anatomischen-histologischen Beweis dafür zu erbringen, daß es drei Arten von Zapfen in der Netzhaut gibt, noch dafür, daß jedes Zäpfchen drei Arten von Resonatoren enthält. Möglicherweise wird es der Zukunft vorbehalten sein, durch Anwendung der höheren Mikroskopiertechnik irgendeine "Dreiheit" in den Zäpfchen zu finden. Man kann heute auf Grund der physiologisch-funktionellen Untersuchungen des Farbensinnes nur annehmen, daß in der Netzhaut drei Arten von Zäpfchen vorhanden sind, denn die Annahme, daß jedes Zäpfchen einen rot-, einen grün- und einen blauempfindenden Apparat enthält, ist weniger wahrscheinlich.

Mit Recht wurden Untersuchungen unternommen, die die Sehschärfe bei weißer Beleuchtung mit der bei farbiger verglichen haben. Aus den Ergebnissen schien sich ein Widerspruch für die Annahme dreier Arten von Zapfen in der Retina abzuzeichnen. Die farbige Sehschärfe müßte theoretisch hinter der

weißen zurückbleiben, denn die Zapfen einer Art müssen weiter voneinander entfernt sein als die aller drei Arten, und bei der Reizung der Retina mit einer farbigen Lichtquelle würde nur die Erregung einer Art von Zäpfchen erfolgen. Die zu erwartende geringere Sehschärfe bei farbiger Beleuchtung ließ sich aber nicht demonstrieren, sondern die Untersuchungen zeigten vielmehr, daß die farbige Sehschärfe nur minimale Unterschiede zur unbunten Sehschärfe zeigt.

Diesem scheinbaren Widerspruch zu der Dreikomponententheorie begegnet man heute mit der Haufentheorie nach Silberstein. Nach dieser Theorie sollen die verschiedenen Arten farbenempfindlicher Zäpfchen auf der Netzhaut nicht in gleichmäßiger Verteilung angeordnet sein, sondern die spezifischen Rezeptoren lägen je nach der Rezeptorenart zu kleinen Haufen zusammen. Betrachte das Auge einen farbigen Gegenstand, werde dieser immer mit dem Rezeptorenhaufen eingestellt, der auf das Reizlicht am stärksten anspreche. In diesem Falle könnten die Rezeptoren einer Art auf der Netzhaut nicht weiter voneinander entfernt sein als die Zapfen verschiedener Arten, und die Sehschärfe im monochromatischen Licht könne sich entsprechend nicht verringern. Liege der Lichtfleck zwischen zwei Rezeptorenhaufen und habe das Auge keine Zeit zur Einstellung, so komme es zu einer Mischempfindung. Die Annahme von drei Zapfenarten und die Tatsache gleicher Sehschärfe bei weißer und farbiger Beleuchtung stünde also nicht grundsätzlich im Widerspruch und wurde bisher mit der Haufentheorie der Rezeptoren verbunden.

Wirklich neue Gesichtspunkte ergaben sich in letzter Zeit aus der Granit'schen Anschauung von der Existenz der Dominatoren und Modulatoren gegenüber der Theorie von Helmholtz, wonach jetzt einem Element allein die Fähigkeit abgesprochen wird, Farbton, Helligkeit und Sättigung zu vermitteln. Erst das Zusammenwirken von Dominatoren und Modulatoren soll dem Auge die Möglichkeit geben, eine Farbe in allen ihren Qualitäten zu erkennen. Diese Annahme wird noch durch andere Untersuchungen und Beobachtungen gestützt, bei denen man feststellen konnte, daß bei farbrüchtigen Patienten die absoluten Schwellenwerte der Fovea centralis nicht verändert waren. Diese neuen Gesichtspunkte auf dem Gebiet des Farbsehens lassen sich in engste Beziehung zu meinen vergleichenden Farbsinnprüfungen bei der Amblyopie bringen, bei welcher wir gerade die umgekehrten Verhältnisse fanden, nämlich einen herabgesetzten Visus, aber einen völlig erhaltenen Farbensinn. Durch die Annahme des Vorhandenseins zweier verschiedener funktioneller rezeptiver Elemente in der Retina, einer-

seits einem für den eigentlichen Farbenapparat, andererseits einem für den eigentlichen Farbenapparat, könnte eine Erklärung für diese Beobachtungen und Untersuchungsergebnisse gefunden werden.

5. Diskussion

Die nun folgenden Erörterungen beruhen auf rein theoretischen Erwägungen. Bei einem Versuch, die verschiedenen Symptome der Amblyopie hinsichtlich ihrer Entstehung zu erklären, könnte man von der Annahme ausgehen, daß von den beiden Rezeptorelementen nur die Dominatoren in das zentral-nervöse Hemmungsgeschehen einbegriffen sind, die Modulatoren hingegen in ihrer Funktion nicht behindert werden. In diesem Fall hätte das Auge seine Fähigkeit, unbunte Gegenstände scharf zu erkennen, feinste Details der Objekte zu unterscheiden und kleinste Punkte noch getrennt wahrzunehmen, verloren, da die Vermittler der unbunten Helligkeitsempfindung, die Dominatoren, durch zentrifugale Impulse gehemmt werden. Diese Verhältnisse treffen wir auch im amblyopen Auge an. Nach obiger Annahme würden die eigentlichen Rezeptoren für die spezifischen farbigen Lichter - die Modulatoren - in das zentral-nervöse Hemmungsgeschehen nicht einbegriffen und könnten infolgedessen ihrer Funktion noch voll gerecht werden, was für das funktionell schwachsichtige Auge ebenfalls zutrifft.

Danach ergibt sich jedoch als weitere Frage, warum bei der Amblyopie selektiv die Dominatoren in ihrer Reizfortleitung gestört sein sollen. Worin läge der Unterschied in den beiden Rezeptorelementen, der eine differente Beteiligung beim Krankheitsbild der Amblyopie erklären könnte? Bis zu dem heutigen Tage ist es noch nicht gelungen, irgendwelche Unterschiede in der strukturellen Konstitution der Zapfenelemente zu beweisen, sondern alle Befunde ergaben sich nur aus rein funktionellen Untersuchungen. Erinnern wir uns zunächst daran, daß man sich heute auf Grund der Untersuchungen O p p e l s zu der Annahme veranlaßt sieht, daß bei der Amblyopie in erster Linie die isolierten Erregungsfortleitungen des Zapfensystems gehemmt werden, die der multipolaren Ganglienzellen jedoch unbeeinträchtigt vonstatten geht. Daran anknüpfend müßte man annehmen, daß die Dominatoren mit jenen Zapfenelementen identisch sind, die sich durch die 1 : 1-Fortleitungen auszeichnen und infolgedessen selektiv gehemmt sind. Die Modulatoren müßten dagegen zu mehreren Rezeptorelementen polysynaptisch Anschluß an ihre zentralen Gebiete im Gehirn finden und ähnlich wie die Stäbchenelemente der Retina in die Hemmungsvorgänge bei der Amblyopie nicht einbegriffen sein. Auf diese Weise könnte die Tatsache, daß ein funktionell schwach-

sichtiges Auge zwar die zentrale Sehschärfe verloren haben kann, aber über seine vollkommene Farbentüchtigkeit verfügt, einem Verständnis nähergebracht werden.

Leider hat man aber für diese Annahme noch keine Beweise anatomisch-histologischer Art erbringen können. Wir wissen weder, in welcher Form die Modulatoren zu den Dominatoren angeordnet sind, noch etwas darüber, in welcher Weise die Erregungen über sie zum Zentrum hin ablaufen. Das Gesagte ist also rein hypothetisch und bedarf noch eingehender Untersuchungen. Möglicherweise wird uns das Elektronenmikroskop in dieser Sache etwas Positives bringen. Oben war von der Unkenntnis der Dominatoren- und Modulatorenanordnung in der Netzhaut die Rede. Gerade aber diese Frage wäre für das Wesen der funktionellen Schwachsichtigkeit von großem Interesse.

Welche Kenntnis hat man heute überhaupt vom Aufbau der Fovea centralis hinsichtlich der Anordnung der Rezeptorelemente?

Die menschliche Fovea besitzt einen Durchmesser von etwa 2 - 2,5 mm, in deren Mitte die stäbchenfreie Foveola centralis mit einem annähernden Querschnitt von 500 - 600 liegt. Das entspricht etwa der Größe von 2° im Sehfeld, so daß auf beiden Seiten des idealen Fixationspunktes des Auges etwa 1° kommt (Polyak 1941). Die funktionelle Höchstleistung der Fovea centralis ist auf eine spezifische Anordnung der Netzhautelemente und deren andersartige Gestalt im Vergleich zu den Sinneselementen der übrigen Bezirke der Retina zurückzuführen.

Durch die Seitwärtsverdrängung aller übrigen Netzhautstrukturen sind die lichtempfindlichen Elemente in der Fovea centralis für die Einwirkung der Lichtstrahlen völlig freigelegt. Am Boden der Fovea bleibt zwischen Limitans externa und interna nur die Sehzellenschicht übrig, die hier ausschließlich aus besonders feingliedrigen Zäpfchen besteht. Stäbchen fehlen in der Foveola noch vollständig, wie umgekehrt die Zapfenanordnung zur Peripherie hin immer lichter wird und sich in der äußersten Peripherie nur noch Stäbchen finden. Setzt man den Abstand vom Netzhautzentrum zur Sehschärfe in Beziehung (Wertheim), kann man feststellen, daß bei einer Abweichung von 10° die Sehschärfe bereits auf $1/5$, bei 20° auf $1/10$ herabgesetzt ist. Die erreichbare Sehschärfe steht also in direkter Abhängigkeit von der Zapfenzahl pro Flächeneinheit.

Auf die speziellen Verhältnisse der Netzhaut übertragen, führte der Vergleich der bei der Sehschärfeprüfung gefundenen Gesichtswinkel mit den durchschnittlichen Größenverhältnissen der Netzhautelemente zu der Vorstellung, daß 2 Punkte nur dann gesondert wahrgenommen werden können, wenn zwi-

schen 2 erregten Zapfenelementen 1 Zapfen liegt, der nicht bzw. weniger stark erregt wird.

Um das Gesagte noch zahlenmäßig zu belegen, seien noch folgende Werte benannt. Nach der bisherigen Lehrmeinung ist zwischen zwei Punkten ein Winkel von 60" erforderlich, um die Möglichkeit zu bieten, sie getrennt abzubilden.

Exakte histologische Angaben über die Größenordnungen der Sinneselemente der menschlichen Netzhaut und anderer Vertebraten verdanken wir dem amerikanischen Wissenschaftler Polyak. Seine eingehenden Untersuchungen über die Sehschärfe im Verhältnis zu der Zapfenverteilung in der Sinneshaut des Auges gestatteten es ihm, Rückschlüsse auf die Zapfendicke zu ziehen. Noch heute sind seine Ergebnisse nicht widerlegt worden, obwohl ihnen von anderer Seite abweichende Werte gegenüberstehen. Analog unseren Erörterungen ist nach Polyak die Perfektion des Okularapparates durch seine strukturellen oder anatomischen und physiologischen Grenzen bestimmt. Daneben macht er für die physikalische Begrenzung die verschiedensten Faktoren verantwortlich, wie die Unzulänglichkeit des dioptrischen Apparates, die verschiedenen von den Lichtstrahlen zu passierenden Gewebearten des transparenten Mediums, die in ihrer Struktur nicht ideal isotrop sind und deshalb nicht die Leistungsfähigkeit gewährleisten, die man von einem idealen optischen System erwarten würde. Die strukturelle oder neuroanatomische Begrenzung ist bedingt durch die Größe, die Zahl und die Verteilung der Rezeptoren und "Konduktoreneinheiten" in der Retina selbst und im Verlauf des Sehweges. An Hand seiner Untersuchungen konnte Polyak Kurven aufstellen, in der die Relation zwischen Winkelabstand der einzelnen benachbarten Zapfen, Zapfendicke und Sehschärfe offensichtlich wird. Im Zentrum der Fovea sieht er die schmalsten, schlankesten Elemente, deren Abstand von Zapfenmitte etwa 1μ beträgt, was einem Winkelwert von 12" entspricht.

Das Gebiet der Fovea, welches die größte Leistungsfähigkeit der Sinneshaut repräsentiert, scheint nach Polyak nicht exakt zirkulär zu sein, sondern sich durch eine ellipsenförmige Form auszuzeichnen. Sein Querschnitt wird von ihm auf annähernd 100μ geschätzt, was einer Winkelgröße von 20' oder $1/3$ Grad entspricht. Dieser Bezirk enthält etwa 50 Zapfenelemente in einer Linie, die dann gemäß der oberen Werte eine Dicke von 24" haben müßten. Diese Größe setzt Polyak auch für den Durchschnittswert der fovealen Zapfenelemente an. Die schmalsten funktionellen Einheiten, deren Querschnitt wie schon erwähnt bis auf 12" - 15" reduziert ist, scheinen nur in sehr geringer Zahl vorhanden zu sein. Polyak schätzt sie auf ein bis zwei Dutzend.

Untersuchungen Österbergs aus dem Jahre 1935 erbrachten den etwas abweichenden Durchschnittswert der Zapfendicke von $2,6\mu$ oder $31''$. In Anbetracht dessen, daß die Arbeiten Polyaks später (1941) unternommen wurden und eingehenderer Natur waren, kann man annehmen, daß sie die präziseren Werte darstellen.

Beziehen wir nun die Größenangaben der Rezeptoren auf das Auflösungsvermögen der Netzhaut, können wir folgende Überschlagsrechnung durchführen. Der Zapfenabstand im Zentrum der Fovea von $12''$ - $15''$ würde in diesem Zusammenhang bedeuten, daß etwa 5 Zapfenelemente die Strecke einer Winkelminute einnehmen. Bei dem von Polyak angenommenen durchschnittlichen Wert von $24''$ würden in dem entsprechenden Gebiet einer Winkelminute annähernd drei Sinneselemente vorhanden sein. Erinnern wir uns, daß die Definition des Auflösungsvermögens besagt, daß die Netzhaut nur dann in der Lage ist, zwei Punkte gesondert wahrzunehmen, wenn durch die Lichtstrahlen zwei Zapfenelemente erregt werden, zwischen denen sich ein weniger bzw. nicht gereizter Zapfen befindet und der Mindestabstand zweier abzubildender Punkte 1 Winkelminute betragen muß, sehen wir hier ein Mißverhältnis und bisher noch nicht geklärte Diskrepanzen.

Bei der Annahme von 5 Zapfenelementen auf 1 Winkelminute in der Mitte der Foveola müßte das Auflösungsvermögen des Menschen wesentlich besser sein, als wir es in Wirklichkeit antreffen. Der Winkelabstand von $60''$ zwischen 2 Punkten wäre danach zu groß, da die wirkliche Zapfenzahl in diesem Gebiet eine größere Trennungsfähigkeit ermöglichen müßte. Sehen wir von den physikalischen Unzulänglichkeiten des Okularapparates ab, so läßt sich aus der im Verhältnis zur foveolaren Zapfendichte "zu niedrigen Auflösungskraft des Menschen" die Schlußfolgerung ziehen, daß wahrscheinlich nicht alle Zapfenelemente funktionell gleichwertig sind, d.h. nicht alle Zapfen durch die gleiche Fähigkeit der farblosen direkten Erregungsfortleitung ausgezeichnet sind. An dieser Stelle müssen wir wieder auf die bereits diskutierte funktionelle Verschiedenheit der Zapfenelemente zurückkommen. Nach den obigen Ausführungen wird nur den Dominatoren die Fähigkeit zuerkannt, Vermittler der Helligkeitsempfindung zu sein. Durch den Besitz von 1:1-Fortleitungen in der Fovea sind es jene Elemente, die das Auge befähigen, farblose Reize gesondert zu verwerten und zum Zentrum weiterzuleiten und damit zu den eigentlichen Trägern des Auflösungsvermögens zu werden. Die funktionell andersartigen Modulatoren zeigen ihre Empfindlichkeitsmaxima immer nur an einem spezifisch begrenzten Bereich des Spektrums und werden daher die Hauptträger der chromatischen Differenzierung

sein und infolgedessen bei dem Zustandekommen der Trennungsschärfe keine Bedeutung erlangen. Bezieht man diese Tatsache auf die Erscheinung des "zu geringen Auflösungsvermögens" der Fovea centralis, ließe sich das zunächst vorhandene Mißverhältnis auflösen.

Nach all diesen Erörterungen scheint die Annahme nicht abwegig zu sein, daß die farbempfindlichen Modulatoren zwischen den Dominatoren angeordnet sind und durch ihre Anwesenheit, aber andersartigen Funktionen und synaptischen Schaltungen das feine Korn der Fovea centralis vergrößern. Obwohl sie durch ihre Anwesenheit die Zapfenzahl pro Flächeneinheit der Netzhaut vermehren, sind sie wegen ihrer Farbspezifität nicht fähig, das Auflösungsvermögen zu heben. Dabei liegt es noch vollkommen im Dunklen, in welcher Art und Weise die Modulatoren zu den Dominatoren angeordnet sind und welches Zahlenverhältnis zwischen den Dominatoren und Modulatoren besteht.

Rein theoretisch kann man sich vorstellen, daß sich um einen Dominator einige Modulatoren gruppieren, die jeweils eine Lücke zwischen dem nächstfolgenden Dominator ausfüllen. Dabei ist es weder möglich, sich auf das zahlenmäßige Verhältnis von Dominatoren und Modulatoren festzulegen noch Angaben darüber zu machen, wieviel Modulatoren auf eine Winkelminute zu beziehen sind. Durch die Zunahme der Zapfenquerschnitte und damit Verminderung der Zapfenzahl in den extrafoveolären Gebieten ändern sich ja die Verhältnisse ständig, so daß man nicht in der Lage ist, eine allgemeine Größenordnung für die gesamte Netzhaut festzulegen.

Der folgende Versuch, ein Modell für die Anordnung der spezifischen Zapfenelemente in der Sinneshaut des Auges zu schaffen, kann sich infolgedessen nur auf das Zentrum der Fovea centralis, die Foveola, beziehen.

Die histologischen Flachschnitte der menschlichen Netzhaut zeigen uns die polygonalgeformten Zapfenelemente dargestellt zueinander angeordnet, daß immer ein zentral stehendes Element von sechs Zapfen kreisförmig umgeben ist (Abb. 2). Bei dieser Verteilung bleiben zwischen drei solcher abgerundeter Einheiten je eine Lücke für ein weiteres Element, das zu keinem anderen zugehören scheint.

Gestützt auf diesen histologischen Befund ist man versucht anzunehmen, daß es sich bei dem zentralstehenden Zapfen um einen Dominator handelt, der von sechs Modulatoren umgeben wird, mit welchen er gekoppelt eine Funktionseinheit bildet, die gemäß früherer Betrachtungen jetzt sämtliche Farbqualitäten wahrnehmen und weiterleiten kann.

Die in den Lücken alleinstehenden Elemente scheinen ebenfalls mit Domina-

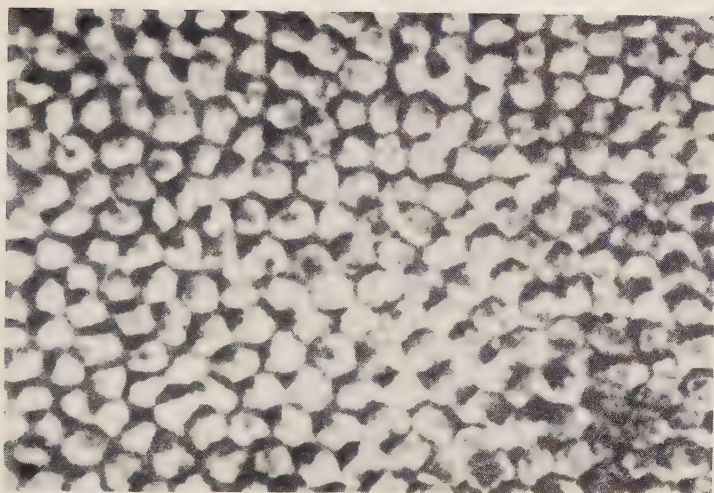
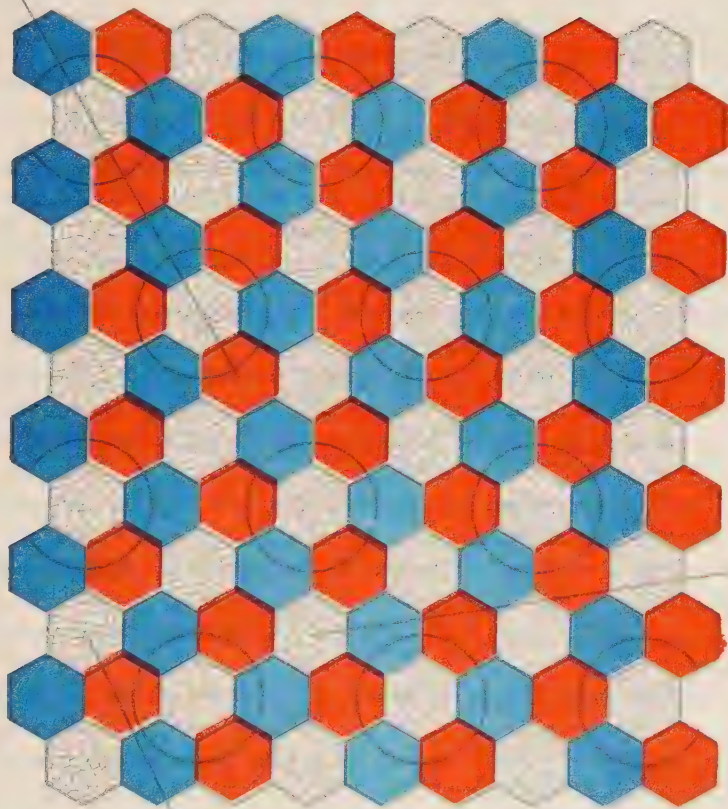


Abb. 2: Mikrophotographie der erwachsenen menschlichen
Retina (nach Polyak)

1b



1a

toren identisch zu sein, die man wegen ihres ungebundenen Verhältnisses zu den anderen Sinneszellen als "freie Dominatoren" bezeichnen könnte.

Man kann bei den Modulatoren hinsichtlich ihrer spezifischen Aufgaben sogar weitergehen, indem man annimmt, daß von den sechs Elementen drei Zapfen über einen Rot-Grün-Apparat verfügen und die restlichen drei sich durch einen Gelb-Blau-Apparat auszeichnen, wobei sich die spezifischen Modulatoren in ihrer kreisförmigen Anordnung einander abwechseln, d.h. zwischen zwei für Rot und Grün spezifischen Modulatoren ein Element für Gelb und Blau liegt. Auf diese Weise sind die Abstände zwischen den spezifischen Rezeptorelementen ständig in gleicher Größenordnung (Abb.3). Die "gekoppelten" und "freien" Dominatoren stellen den Weiß-Schwarz-Apparat.

Mit der Annahme einer derartigen Verteilung der Modulatoren und Dominatoren in der Netzhaut wäre es möglich, verschiedene bisher ungeklärte Widersprüche, die sich aus den sinnesphysiologischen Beobachtungen und den anatomischen Befunden der Netzhautstruktur ergeben, zu erklären.

Bezieht man die im oben angeführten Modell zur Dominatorenverteilung angenommene Aufgliederung auf die Frage des zentralen Auflösungsvermögens des Menschen, so findet sich in unserem Modell nun keine Diskrepanz mehr zwischen Rezeptorenzahl und tatsächlichem Auflösungsvermögen. Bei einem durchschnittlichen Zapfendurchmesser von $12'' - 15''$ in der Foveola ist jeder Dominator von den nächstfolgenden wenigstens $24'' - 30''$ entfernt. In Anbetracht dessen, daß man für die Trennung zweier Punkte zwei erregte Zapfenelemente fordert, die einen unerregten in sich einschließen, müßte man den Wert noch verdoppeln und erhält dann etwa die Größe einer Winkelminute ($2 \text{ mal } 24'' - 30'' = 48'' - 60''$), also den Wert, den man auf Grund vieler Berechnungen festgestellt hat.

Auch eine weitere bekannte Tatsache, daß die Noniussehschärfe unter allen Umständen sowohl die Formempfindlichkeit als auch die einfache Trennschärfe um ein Vielfaches übertrifft, könnte unter Zugrundelegung der angenommenen Rezeptorenverteilung in der Netzhaut ebenfalls zwanglos erklärt werden. Die Noniussehschärfe ist für Durchschnittsbeobachter etwa 3-10 mal größer als die einfache Trennschärfe oder die Formempfindlichkeit (Schober). Wenn man zwei Linien, die hintereinander liegen, solange seitlich verschiebt, daß sie getrennt wahrgenommen werden können, erhält man die Noniussehschärfe. Hering erklärte dieses Phänomen dadurch, daß die obere Linie von einer anderen Zapfenreihe aufgenommen wird als die untere (Abb.4). Unsere schematische Darstellung in Abb.3 zeigt in der Tat eine reihenmäßige Anordnung der Zapfenelemente, wobei die Dominatoren so-

wie die Modulatoren einmal mit dem Rot-Grün-Apparat, zum anderen mit dem Gelb-Blau-Apparat reihenmäßig eng hintereinander angeordnet sind. Beim Ablesen einer Meßgröße an einem Maßstab müßte der obere Noniusstrich eine Zapfenreihe treffen, der untere die nächstfolgende, wobei natürlich die Farbspezifität gewahrt bleiben muß. Der Abstand zwischen den Reihen gleichartiger Rezeptorelemente z. B. von Dominator zu Dominator beträgt etwa 24" - 30".

In dem Vorhergehenden war von dem gleichen Auflösungsvermögen bei farbigen und unbunten Sehzeichen die Rede, die man heute allgemein mit der Haufentheorie nach Silberstein zu erklären versucht. Diese Theorie fand durch Punktreizversuche von Hartridge und die Versuche über Farbtorschwankungen an kurz dargebotenen Minimalfeldern von Homgreen und Loevenich Anerkennung.

Obwohl Schober die Ansicht vertritt, daß die Haufentheorie der Rezeptoren, die Silberstein, Berg und Hartridge unabhängig voneinander gefunden haben, die einzig mögliche Erklärung für die Farbunabhängigkeit der Sehschärfe sei, wird durch unsere Rezeptorenanordnung noch eine weitere Möglichkeit aufgezeigt. Durch die vollkommen gleichmäßige Verteilung der farbspezifischen Elemente über die Sinneshaut und die gleichen Abstände zwischen den einzelnen Rezeptoren muß die farbige Sehschärfe theoretisch nicht hinter der unbunten zurückbleiben. Die Erscheinung der Farbtorschwankung bei kurz dargebotenen Farbzeichen kann damit zusammenhängen, daß durch die zu kurze Darbietungszeit das Auge nicht imstande ist, den Reiz vollkommen zu verwerten. Die Zeit ist zu kurz, um das Reizlicht bestimmter Wellenlänge auf die spezifische Zapfenreihe einzustellen und durch das Hinzukommen neuer Einflüsse bei Beendigung der Darbietungszeit kommt es nun zu einer Mischempfindung.

Gegen die Haufentheorie spricht auch die Tatsache der viel größeren Noniusschärfe gegenüber der einfachen Sehschärfe und Formempfindlichkeit, da bei einer Anordnung der farbspezifischen Modulatoren zu Haufen eine Reihenanordnung der Elemente nicht gewährleistet wäre. Die höhere Noniusschärfe im Gegensatz zu der einfachen Trennschärfe könnte bei einer derartigen Anordnung der Rezeptoren gar nicht zustande kommen. Der nächstfolgende für eine bestimmte Farbqualität spezifische Haufen müßte hier zu weit entfernt liegen, um eine gleiche Noniusschärfe gewährleisten zu können.

Nach unserem Modell dürfte die Netzhaut also aus einer Vielzahl von Funktionseinheiten aufgebaut sein, die jeweils aus einem zentralstehenden Dominator und sechs um ihn herum gruppierten Modulatoren bestehen dürfte,

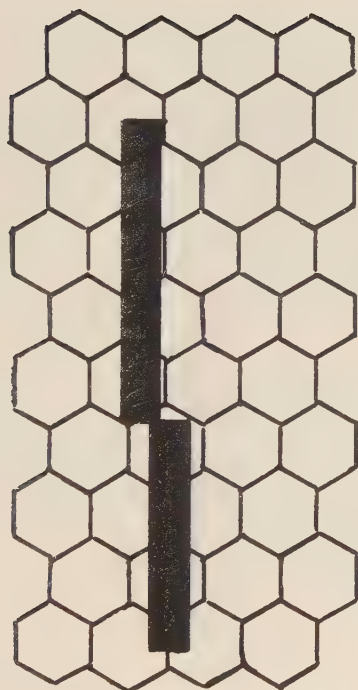


Abb. 4

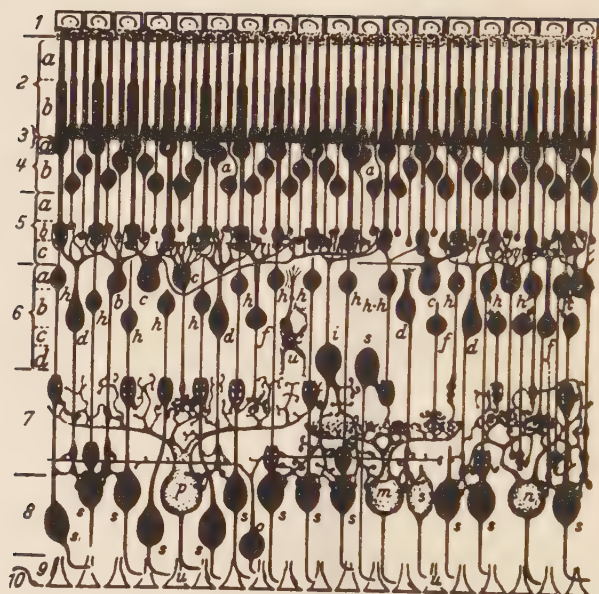


Abb. 5

zwischen denen sich noch die "freien" Dominatoren befänden. Letztere sollte man deshalb als "freie" bezeichnen, weil sie vollkommen isoliert auf dem Wege einer 1 : 1-Fortleitung ihre Erregungen an das Zentrum weiterleiten. Sie sind mit jenen Elementen identisch, die über eine eigene Bipolare und Ganglienzelle verfügen. Die Erregungsfortleitung der Modulatoren und des zugehörigen "gekoppelten" zentral stehenden Dominators muß andersartig erfolgen.

Die dem Farbsinn dienenden Zapfen scheinen ähnlich den Stäbchen in peripheren Gebieten zu mehreren zusammengeschaltet zu sein und etwa in der inneren Körnerschicht mit dem zentral stehenden Dominator in Siebenergruppe (1 Dominator : 6 Modulatoren) gekoppelt, ihre Erregungen en bloc auf dem Weg über eine einzige Sehnervenfaser zu den Sehzentren fortzuleiten.

Bei derartigen Erwägungen befindet man sich nicht im Bereich reiner Spekulation, da an Hand eingehender Untersuchungen Polyaks die anatomische Struktur der Retina weitgehend bekannt ist. Abb. 5 gibt eine schematische Darstellung der Primatenretina nach Polyak wieder, aus der die verschiedenen Möglichkeiten der synaptischen Zusammenschaltung und die verschiedenen Neuronentypen hervorgehen. Neben den Direktfortleitungen erkennt man nicht nur die Zusammenfassung mehrerer Rezeptoren durch Bipolaren, sondern auch die weiter aufsteigende Konvergenz durch Riesenganglienzellen im letzten Neuron der Retina.

Da sich unser Modell speziell auf die Foveola bezieht, fallen hier die großflächigen Verknüpfungen in Form der Riesenganglienzellen und die Erregungsfortleitung der Stäbchen fort. Hier sind lediglich die zu einem Dominator gehörenden Modulatoren durch eine gemeinsame Bipolare in der inneren Körnerschicht mit ihrem "gekoppelten" Dominator verbunden. Während also die Sinneszellen der äußeren Körnerschicht spezifisch auf Lichtreize verschiedener Wellenlängen reagieren, werden in dem zweiten Neuron bereits zusammengefaßte Informationen en bloc zu ihren höheren Zentren weitergeleitet.

Zum Verständnis der geschilderten Verhältnisse wurde in Abb. 6 in schematischer Darstellung versucht, die verschiedenen Möglichkeiten der synaptischen Zusammenschaltung wiederzugeben.

Die drei aufgezeigten Schaltmechanismen entsprechen der angegebenen Schnittführung in Abb. 3. Durch die zweidimensionale Form der Darstellung ist es nicht möglich, eine ganze Funktionseinheit in einem Schaltschema zu erfassen, sondern man erhält bei einem derartigen Vorgehen nur verschie-

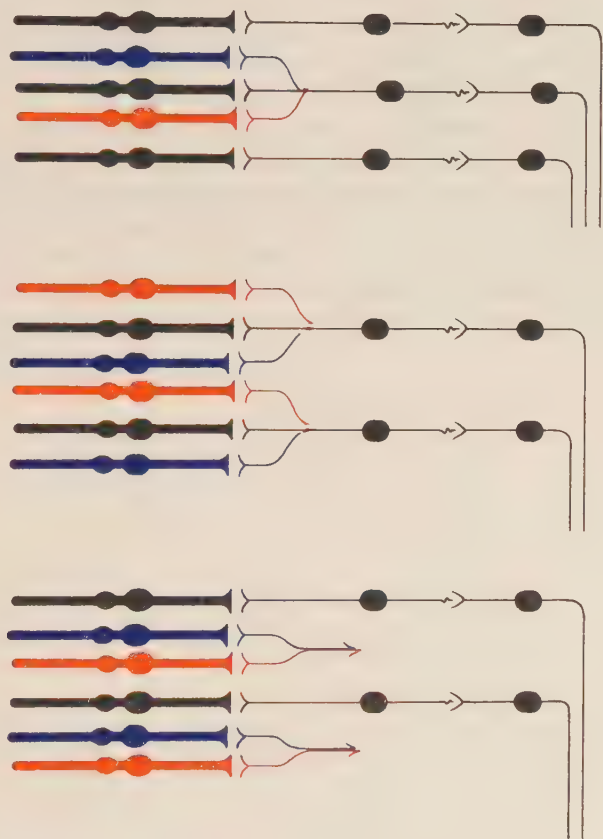
dene Schnittebenen. Das Schema zeigt aber die unterschiedliche synaptische Zusammenschaltung der "gekoppelten" Dominatoren zu den "freien". Für die Annahme derartiger Verhältnisse sprechen auch die Angaben von Granit, der für das Menschaugen für 4-7 Mill. Zapfen und 125 Mill. Stäbchen in der Netzhaut nicht mehr als höchstens 1 Mill. Nervenfasern angibt. Durch die polysynaptische Zusammenfassung der Modulatoren auch in der Fovea und die immer großflächiger werdenden zusammengeschalteten Funktionsareale in der Peripherie, für welche in der äußeren Ganglienzellschicht Riesenganglienzellen vorhanden sind, wird dieses Verhältnis von Rezeptoren zu Nervenfasern verständlich.

Nach meinen Ausführungen über die vielfachen Versuche, das Farbensehen zu erklären, über die Bemühungen vieler Wissenschaftler, um die Klärung der funktionellen und strukturellen Eigenarten der Netzhautelemente und über den Bau und die Leistungsfähigkeit der menschlichen Retina möchte ich abschließend wieder auf die Amblyopie und meine Untersuchungsergebnisse zurückkommen. Nach all dem Gesagten scheint es sich bei der funktionellen Schwachsichtigkeit in der Tat darum zu handeln, daß die in einer Funktionseinheit mit den Dominatoren vereinten Modulatoren wegen ihrer polysynaptischen Erregungsfortleitungen zum Zentrum hin nicht in ihrer Funktion gestört sind. Die der Amblyopie zugrunde liegenden Hemmungsprozesse scheinen tatsächlich nur die durch 1:1-Fortleitungen an das Zentrum angeschlossenen Dominatoren zu betreffen.

III. ZUSAMMENFASSUNG

Die vergleichenden Farbsinnuntersuchungen am amblyopen und normalsichtigen Auge ergaben keine signifikanten Unterschiede. Das funktionell schwachsichtige Auge zeigt danach Fehlleistungen, die sich nur auf einen Teil der Zapfenfunktionen beziehen und auf Hemmungsimpulsen zu beruhen scheinen, die sich von der Sehrinde über corticofugale Nervenfasern bis in die Netzhaut auf die 1:1-Synapsen der freien Dominatoren erstrecken.

Diese Beobachtung und Tatsache wurde mit dem Vorhandensein funktionell verschiedener Zapfensorten zu erklären versucht, dem Vorhandensein der Dominatoren und der Modulatoren. Die Dominatorenelemente, als Träger des eigentlichen optognostischen Apparates, die im foveolären Gebiet der Netzhaut durch ihre 1:1-Fortleitungen ausgezeichnet sind, werden bei der Amblyopie selektiv gehemmt, was durch den Ausfall der wesentlichen Faktoren des optognostischen Apparates zum Ausdruck kommt. Die Modulatoren, de-



nen die spezifische Reizbeantwortung der verschiedenen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums obliegt, werden nach meinen Untersuchungen in das vom Zentrum ausgehende Hemmungsgeschehen nicht mit einbegriffen und gewährleisten dem amblyopen Auge die volle Fähigkeit der Farbdifferenzierung.

Das scheint darin begründet zu sein, daß die Modulatorenelemente ähnlich wie die Stäbchen über eine andere Art der Erregungsfortleitung verfügen, die durch die polysynaptische, in Gruppen abgeleitete Erregungsfortleitung charakterisiert ist. In der Netzhaut scheinen Funktionseinheiten vorhanden zu sein, die sich aus einem Dominator und mehreren Modulatoren zusammensetzen. Nur durch ein ausgeglichenes Zusammenarbeiten beider Teile ist das Auge im vollen Besitz seiner Fähigkeit. Durch die Annahme einer selektiven Störung der monosynaptischen Zapfenelemente lassen sich die optognostischen Störungen des amblyopen Auges sowie die Intaktheit des Farbsinnes, der ebenfalls eine Zapfenfunktion darstellt, jedoch auf polysynaptischen Prozessen zu basieren scheint, einem weiteren Verständnis näherbringen.

SCHRIFTTUM

- Buchwald, E. : Fünf Kapitel Farbenlehre, Physikverlag Mosbach, 1955
- Cibis, P. : Über den gegenwärtigen Stand der Theorie des Farbensehens, Ber. ü. d. 54. Zusk. d. Dtsch. Ophth. Ges. in Heidelberg, 1948, S.62 ff.
- Gottschick, J. : Die Leistungen des Nervensystems, 2. Aufl., Jena, 1955, S.340 ff.
- Granit, R. : Einige Ergebnisse und Prinzipien der Netzhautforschung, Stud.gen. 10, 1957, S.244-251
- Faust, C. : Die cerebralen Herdstörungen bei Hinterhauptsverletzungen und ihre Beurteilung, Stuttgart, 1955, S.61 ff.
- Harrison, E. R. : Visual Acuity and the Cone Cell Distribution of the Retina, Brit. J. Ophth. 1953, 37, S.538 ff.
- Krawkow, S. W. : Das Farbensehen, Akademie-Verlag, Berlin, 1955, S.43 ff.
- Monjé, M. : Die Theorien der Farbempfindung, Der Augenarzt, Bd. I, S.447
- Monjé, M. : Anleitung zur Untersuchung des Farbensinnes mit dem Anomaloskop, Klin. Mb. für Augenheilkunde, Bd.130, 1957, S.701 ff.
- Müller-Limmroth, W. : Elektrophysiologie des Gesichtssinnes, Springer-Verlag, Berlin 1959, S.204 ff.
- Oppel, O. : Über unsere gegenwärtigen Vorstellungen vom Wesen der funktionellen Schwachsichtigkeit, Klin. Mbl. für Augenheilkunde, Bd.136, S.1-20, 1960
- " Entwicklungsgeschichtliche Betrachtungen über die funktionelle Natur der Amblyopie, Die Med. Welt 1960
- " Vergleichende Untersuchungen über das Verhalten der Dunkeladaptation normaler und schielamblyoper Augen, Graefes Arch. Ophthalm. B 159, S.486 (1958)
- " Vom Einfluß des Zentralnervensystems auf die Entstehung des Begleitschielens und der Schielschwachsichtigkeit, Habilitationsschrift, Univ. Bibliothek Mainz (1958)
- " Zur Begutachtung fraglicher einseitiger Amblyopien (Differentialdiagnostische Erwägungen), Klin. Mbl. für Augenheilk. Bd.136, S.563 (1960)

- Polyak, St. : The Retina, The University of Chicago Press,
Chicago 1941
- Richter, M. : Die neuere Entwicklung auf dem Gebiete der Farb-
sinnprüfung, Klin. Mbl. für Augenheilk. Bd. II 9,
1951, S. 61 ff.
- Rohen, J. : Der Augenarzt, Bd. I, 1958, S. 1 ff.
- Trendelenburg, W. : Über die für das Anomaloskop geeignete Lichtqualität
sowie die Frage der Übergangsfälle zwischen Norm
und Protanomalie, Klin. Mbl. für Augenheilk.
Bd. 102, S. 769 ff. (1939)
- " Über den Licht- und Farbensinn, Walter de Gruyter
und Co., Berlin, 1943
- Schober, H. : Das Sehen, Bd. I und II, 1958

Herrn Priv. Doz. Dr. med. O. Oppel danke
ich für die Überlassung des Themas und die
vielseitigen Anregungen bei der Durchführung
meiner Arbeit.

LEBENS LAUF

Ich, Brigitte Dencker, bin am 21.4.1937 in Berlin als zweites Kind des Ingenieurs Werner Dencker geboren. Durch die Tätigkeit meines Vaters als Fabrikdirektor in Wien wohnten wir von 1939 - 1943 bei Wien.

Im Jahre 1943 siedelten wir nach Breslau über, da mein Vater dort eine andere Werkleitung übernahm. Im Januar des Jahres 1945 mußten wir wegen Einschlußgefahr durch die vorrückenden russischen Truppen Breslau verlassen. Durch die Flucht verloren meine Eltern den gesamten Hausrat und ihr ganzes Vermögen.

Als Flüchtlingsfamilie lebten wir daraufhin im Erzgebirge, Gotha und Nordhausen. Erst hier begann für mich der geregelte Schulbesuch.

Im Jahre 1950 übersiedelten meine Eltern aus beruflichen Gründen meines Vaters nach Berlin. Nach vierjährigem Besuch der Humboldt-Oberschule in Eichwalde machte ich 1955 das Abiturium, das ich mit gutem Erfolg bestanden habe. Ich hatte das Glück, gleich nach Abschluß der Oberschule an der Humboldt-Universität in Berlin zum Medizinstudium zugelassen zu werden, was ich bis zum 6. Semester durchgeführt habe.

Ich war entschlossen, mein Studium an der Berliner Humboldt-Universität zu Ende zu führen, weil ich mich aus dem harmonischen Leben des Elternhauses in den nächsten Jahren noch nicht lösen wollte. Diesem Vorsatz konnte ich jedoch durch die politische Entwicklung an der Humboldt-Universität nicht treu bleiben.

Seit 1958 studiere ich an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz und beginne im Frühjahr 1961 mit dem Staatsexamen.

